

VU Research Portal

Achtergrondruis ten voordele van neuronale signalering bij de mens

Keuss, P.J.G.; van Rossum, E.N.A.; Das-Smaal, E.A.

published in

Nederlands tijdschrift voor de psychologie
1997

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

Keuss, P. J. G., van Rossum, E. N. A., & Das-Smaal, E. A. (1997). Achtergrondruis ten voordele van neuronale signalering bij de mens. *Nederlands tijdschrift voor de psychologie*, 52, 220-235.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

Achtergrondruis ten voordele van neuronale signalering bij de mens

Paul J.G. Keuss, Eric N.A. van Rossum en Edith A. Das-Smaal*

Stochastische resonantie is een paradoxaal aandoend verschijnsel, waarbij toevoeging van ruis een net niet waarneembaar signaal detecteerbaar kan maken. In de fysica is het al geruime tijd bekend. Het verschijnsel is in de psychologie in beginsel toepasbaar waar stimuli onderdrempelig raken, terwijl detectie toch vitaal is voor menselijk functioneren. Dit overzicht heeft tot doel het verschijnsel uit te leggen en voor alle zintuigen van de mens na te gaan waar in de neurale informatietrans-

missie een aangrijpingspunt ligt voor nuttige toevoeging van achtergrondruis aan het signaal.

Een tweede oogmerk van deze studie is tot concrete aanbevelingen te komen voor applicaties die metterdaad de (oudere en gehandicapte) mens behulpzaam kunnen zijn om het neuronaal signaleren te verbeteren. De voorlopige conclusie luidt dat zeker op het terrein van de tastzin en het gehoor geschikte hulpapparaten mogelijk zijn die in een behoefte kunnen voorzien.

Inleiding

Doel van dit artikel is onder psychologen belangstelling te wekken voor een verschijnsel dat in de fysica onder de term stochastische resonantie al geruime tijd met vrucht wordt toegepast (Maddox, 1994). Collins e.a. (1995a) definiëren stochastische resonantie als het verschijnsel dat de respons van een non-lineair systeem op een zwak periodiek input-sigitaal wordt geoptimaliseerd door de aanwezigheid van een bepaald ruisniveau. De term duidt op een soort samenwerking (resonantie) tussen een zwak periodiek signaal en een toevallig (stochastisch) mengsel van signalen, ofwel witte ruis. Daarbij trekt het zwakke signaal de ruis als het ware mee in zijn regelmaat. Dat versterkt het signaal en tilt het over de waarnemingsdrempel. In dit artikel wordt het verschijnsel stochastische resonantie eerst geïntroduceerd. Vervolgens zal het nut van achtergrondruis voor het menselijk zintuigelijk functioneren onder de loep worden genomen.

Dat achtergrondruis nuttig kan zijn, wekt aanvankelijk bevreemding. In de signaalanalyse is ruis immers altijd beschouwd als nadelig en hinderlijk voor het proces van signaalcodering. In de signaaldetectietheorie, welke door de waarnemingspsychologie wordt gebruikt, wordt verondersteld dat een sensorisch proces altijd optreedt, zelfs wanneer geen stimulus is aangeboden. Interne en externe factoren die daarvoor verantwoordelijk zijn, worden collectief beschreven als achtergrondruis en opgevat als een storing die de nauwkeurigheid van informatieoverdracht beperkt. In de nieuwe zienswijze wordt, met empirische ondersteuning, naar voren gebracht dat in bepaalde niet-lineaire systemen 'random input noise' de signaal/ruis-verhouding over een beperkte operatiebreedte verbetert. Zo kan in een situatie waarin zonder ruis het signaal onder de waarnemingsdrempel blijft, een bepaalde hoeveelheid achtergrondruis het signaal over de drempel tillen. Dit minimum ruisniveau bepaalt dan de ondergrens voor het optreden van stochastische resonantie. Er is ook een bovengrens: een teveel aan ruis overstemt het signaal, waardoor het weer verdwijnt. Stochastische resonantie blijkt een intrigerend en uni-

* Vrije Universiteit, Vakgroep Psychonomie, De Boelelaan 1111, 1081 HV Amsterdam. Correspondentie richten aan de eerste auteur.

verseel verschijnsel te zijn. Honderden recente wetenschappelijke publicaties op het gebied van de natuur- en scheikunde maar ook binnen de biologie en de neurowetenschappen getuigen daarvan (zie o.a. Bulsara & Gammaitoni, 1996; Collins e.a., 1995a; Morse & Evans, 1996; Moss & Wiesenfeld, 1995; Wiesenfeld, 1993; Wiesenfeld & Moss, 1995). Het verschijnsel is aangetoond bij onder meer elektrische circuits, laseropstellingen en in supergeleidende systemen voor het ontdekken van minieme veranderingen in magnetische velden. Toepassingen liggen in het nabije verschiets. Zo vindt onderzoek plaats naar de mogelijkheid van verbetering van signaaldetectie met magnetische detectoren die de Amerikaanse marine gebruikt om onderzeeërs, vliegtuigen en mijnen op te sporen (Bulsara & Gammaitoni, 1996). Een tot de verbeelding sprekende demonstratie van stochastische resonantie wordt uitvoerig besproken door Moss en Wiesenfeld in *Scientific American* (1995). Men laat in een zogenaamde 'ring-laser' licht in een bepaalde richting rondgaan, met de klok mee of tegen de klok in. In het circuit functioneert een opto-akoestische modulator met een frequentie van 2 kHz als schakelaar voor de richtingsomkeer van het licht. Deze golf wordt met een zekere periodiciteit aangeboden, waardoor het licht regelmatig van richting verandert. Vervolgens wordt het golfsignaal zodanig verzwakt dat het onderdrempelig wordt: de schakelaar werkt niet meer. Voegt men nu aan dat verzwakte signaal een bepaalde mate van achtergrondruis toe, met een spectrum van 0 tot 6 kHz, dan blijkt dat het licht weer wel van richting verandert en dat dus de schakelaar door middel van ruis toevoeging weer functioneert.

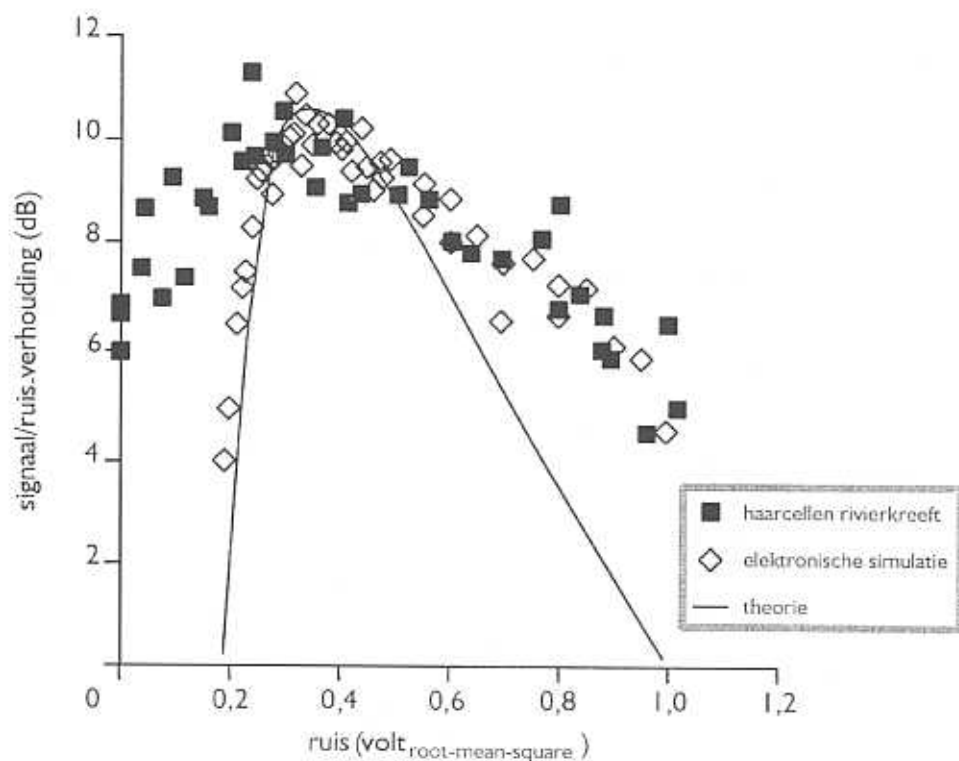
Wat het bovengenoemde *Scientific American*-artikel bijzonder maakt is dat het beschrijft hoe Moss en zijn medewerkers als eersten een belangrijke wending geven aan het stochastische resonantie-onderzoek. Zij maken de overstap van bestudering van de werking van een artificiële naar die van een organische sensor, in casu de tastzin van de rivierkreeft. Het onderzoek toont aan dat de tastzin wordt begunstigd door achtergrondruis, daar waar het zintuig tegen de grens van signaaldetectie aan zit. De proeven zijn ingenieus en daarom al het vermelden waard. Tevens geeft het werk aanleiding tot het opwerpen van enkele kritische discussiepunten die van belang zijn voor de bespreking in dit artikel van het nut van achtergrondruis voor het menselijk functioneren.

Op de staart van de rivierkreeft bevinden zich haartjes die gevoelig zijn voor beweging van water, zoals onder meer veroorzaakt door een aanzwemmend roofdier, bijvoorbeeld een snoekbaars. Bij beweging genereert een

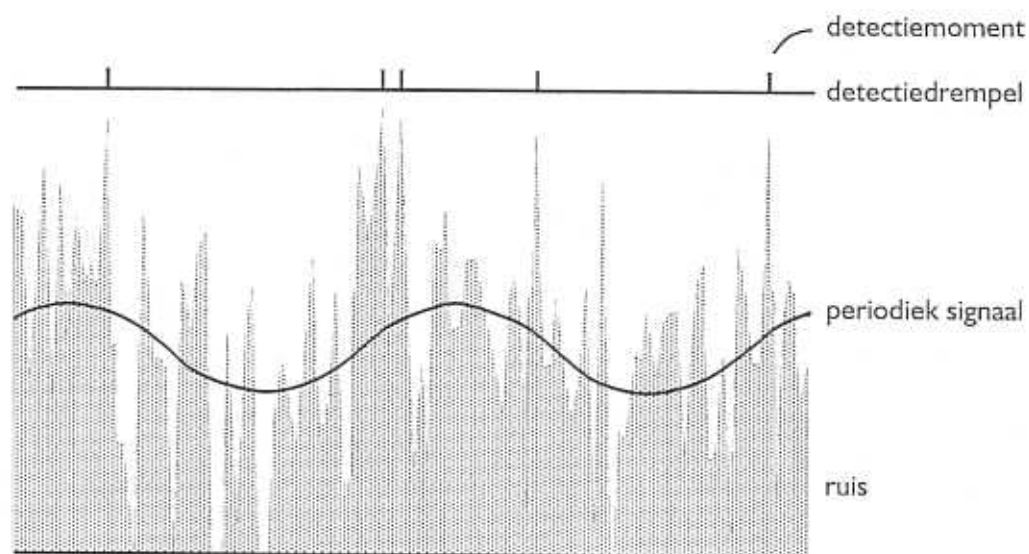
haarcel een zenuwimpuls. Deze zenuwimpuls wordt gekenmerkt door een smalle piek van 100 millivolt met een duur van 200 microsec. De extreme gevoeligheid van de cel laat zich afmeten aan het feit dat de haarcel een periodieke beweging van 10 nanometer in amplitude kan detecteren, de uitslag van een receptorcel in vitro. Deze cel-informatie, alsmede die van tal van overige haarcellen, wordt doorgegeven naar een beslissingscentrum, een netwerk van interneuronen op het vlak van de ganglioncellen. In dit zenuwcentrum klinkt het commando tot de rivierkreeft: *Blijf of Vlucht*.

In de door Moss en Wiesenfeld beschreven waterbakproef werd een stuk staart met haarcellen op een stok aangebracht. Het geheel werd in de waterbak bevestigd. De individuele zenuwcellen waren met elektroden verbonden om de reacties te kunnen meten. De stok, en daardoor ook het water, kreeg een periodieke beweging mee, die resulteerde in een onderdrempelige haarcelbeweging van onder de 10 nanometer. De signaal/ruis-verhouding voor de tastzin bleef dus nihil. Gerandomiseerde achtergrondruis werd toegevoegd aan de stok, die daardoor een extra 'onmerkbare' trilling meekreeg. Hiervan werd de amplitude in diverse stappen van laag tot hoog opgevoerd. Het resultaat was frappant. Metingen van actiepotentialen via de elektroden lieten het karakteristieke beeld van stochastische resonantie zien: bij toenemende ruis gingen de haarcellen reageren op een signaal waar ze zonder ruis ongevoelig voor waren. Bij te veel ruis werd het signaal overstemd en verdween die reactie weer. Figuur 1 laat zien hoe de signaal/ruis-verhouding toenam en de hoogste waarde bereikte bij een hoeveelheid toegevoegde ruis van 0,3 volt. Daarna nam de signaal/ruis-verhouding weer af. In dezelfde grafiek staan ook de theoretische predicties op grond van een in Moss e.a. (1993) beschreven model voor stochastische resonantie. De lichte discrepantie tussen theorie en resultaten wordt besproken bij de discussiepunten.

Een belangrijk kenmerk van stochastische resonantie is dat de input/output-relatie non-lineair is. In een lineair systeem geeft een verandering in input een evenredige verandering in output. Bij een non-lineair systeem is dat niet zo. Bij een kleine verandering in input kan de output sterk wijzigen. Een zwak input-signaal kan bijvoorbeeld net over een 'drempel' geholpen worden en wel in plaats van geen respons geven, zoals in het voorbeeld van de rivierkreeft. Voor stochastische resonantie geldt dat alleen wanneer het zwakke, periodieke signaal tegen die drempel aan zit, er bij toegevoegde ruis kans op detectie is. Dit is geïllustreerd in figuur 2. Geen of te weinig ruis doet niets. Matige toevoeging van ruis leidt tot signaaldetectie.



Figuur 1. Signaal/ruis-verhouding als functie van toegevoegde, respectievelijk hydrodynamische en elektronische gaussische ruis bij haarcellen van een rivierkreeft, een elektronische simulatie (Fitzhugh-Nagumo) en een theoretisch model.



Figuur 2. Onderdrempelig periodiek signaal met toegevoegde ruis. De non-lineaire detector detecteert alleen signalen boven een bepaalde drempel. Ruis maakt de kans op detectie groter, vooral rond de top van het periodieke signaal. In dit model geeft de output van de detector aldus informatie over de periodiciteit van het onderdrempelig signaal.

tie. Te veel ruis leidt tot vermindering van de signaal/ruis-verhouding, zoals goed te zien is in figuur 1.

Een aardig voorbeeld van hoe daar zelf thuis mee geëxperimenteerd kan worden, is beschreven door Garver en Moss (*Scientific American*, augustus 1995, p. 84-87). Zij laten zien hoe muziek die net te zacht staat om gehoord te worden, door extra witte ruis opeens wel te beluisteren valt. Ook hier geldt weer: te veel ruis leidt tot overstemming van het signaal.

Discussiepunten

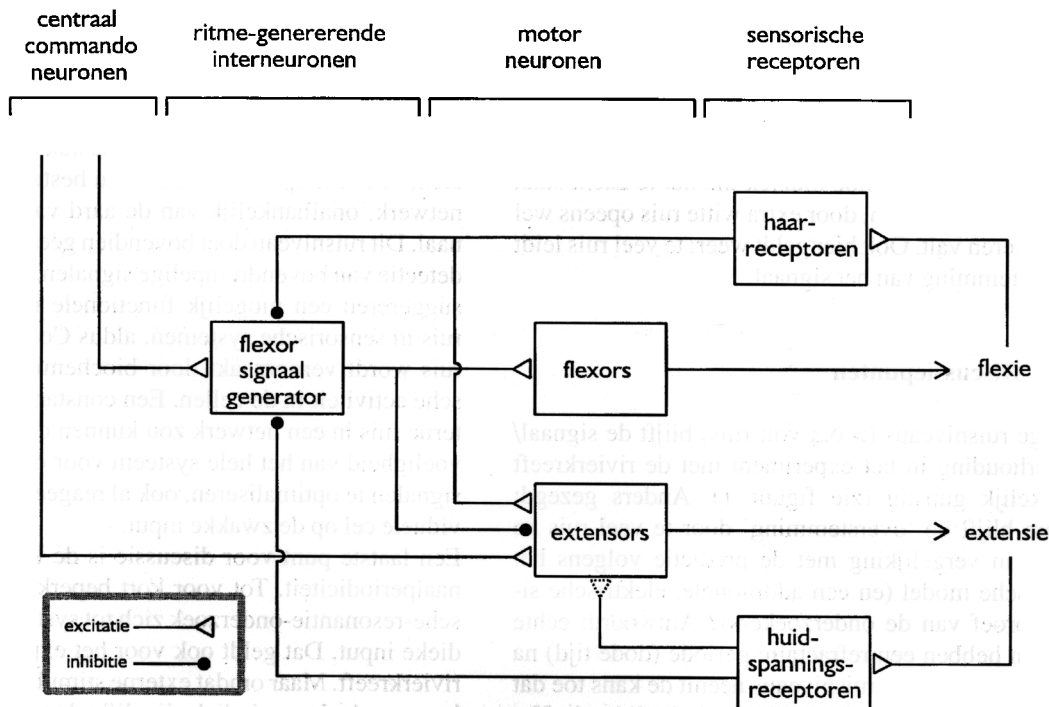
Bij hoge ruisniveaus ($> 0,4$ volt rms) blijft de signaal/ruis-verhouding in het experiment met de rivierkreeft betrekkelijk gunstig (zie figuur 1). Anders gezegd: waarom blijft de 'overstemming' door te veel ruis zo lang uit in vergelijking met de predictie volgens het theoretische model (en een additionele, elektrische simulatieproef van de onderzoekers)? Antwoord: echte neuronen hebben een refractaire periode (dode tijd) na elke vuring. Bij hoge ruisniveaus neemt de kans toe dat het volgende 'ruisige' signaal in de dode tijd valt. Het netto-effect is dat een fysisch hoger ruisniveau fysiologisch op lager niveau uitkomt. Relevant is het onderscheid tussen de absolute en de relatieve refractaire periode. Tijdens de absolute refractaire periode voldoet de cel niet aan de voorwaarde van een non-lineair input/output-systeem. Tijdens de relatieve refractaire periode echter is er sprake van een verhoogde vuurdrempel van de cel die de non-lineariteit van input/output-systeem onaangetast laat, hetgeen de mogelijkheid biedt voor het optreden van stochastische resonantie.

Met betrekking tot type signaal en type ruis waarbij stochastische resonantie optreedt, zijn er in de recente literatuur aanwijzingen dat het signaal niet sinusoïdaal hoeft te zijn noch dat het ruisspectrum daarmee hoeft te overlappen. Levin en Miller (1996) constateerden dat de gevoeligheid van het mechano-sensorische systeem van de krekels voor luchtpartikels verbeterde met frequentiespectra van onregelmatige turbulenties die geen 'overlap' hadden met de signaalfrequentie.

Een ander punt is dat bij signaaldetectie in biologische systemen in het algemeen parallelle detectie door groepen van sensorische zenuwcellen aan de orde is. Bij de rivierkreeft werden individuele cellen getest. Daar trad stochastische resonantie op. Maar een beperking voor de effectiviteit van stochastische resonantie bij groepen in plaats van individuele cellen zou kunnen zijn dat de optimale intensiteit van de ruis per cel bepaald is door-

dat cellen verschillen in signaleringsvermogen en detectiedrempel. Collins e.a. (1995a) lieten echter in een theoretische studie zien dat er voor grote netwerken van neuronen, naast een noodzakelijke minimum ruisintensiteit voor het optreden van stochastische resonantie op zich, een vast optimaal ruisniveau bestaat voor het hele netwerk, onafhankelijk van de aard van het input-signaal. Dit ruisniveau doet bovendien geen afbreuk aan de detectie van bovendrempelige signalen. Deze resultaten suggereren een mogelijk functionele rol voor interne ruis in sensorische systemen, aldus Collins e.a. Interne ruis wordt veroorzaakt door biochemische en elektrische activiteit in de cellen. Een constant niveau van interne ruis in een netwerk zou kunnen dienen om de gevoeligheid van het hele systeem voor onderdrempelige signalen te optimaliseren, ook al reageert niet elke individuele cel op de zwakke input.

Een laatste punt voor discussie is de kwestie van signaalperiodiciteit. Tot voor kort beperkte het stochastische-resonantie-onderzoek zich tot systemen met periodieke input. Dat geldt ook voor het experiment met de rivierkreeft. Maar omdat externe stimuli in het dagelijks leven vaak niet periodiek zijn, lijkt de toepasbaarheid in praktische situaties niet zo groot. Zoals opgemerkt door Collins e.a. (1996), is de focus op periodieke input deels te wijten aan de gebruikte technieken om stochastische resonantie aan te tonen. Deze gaan uit van de input-signaalfrequentie (voor een gedetailleerde beschrijving zie bijv. Moss e.a., 1993; Wiesenfeld, 1993) en zijn dus ongeschikt voor systemen met aperiodieke input. Onlangs hebben Collins e.a. (1996) echter aangetoond dat stochastische resonantie ook werkt bij aperiodieke input-signalen. Daartoe ontwikkelden zij eerst een andere techniek (beschreven in Collins e.a., 1995b), waarmee ze de coherentie tussen een aperiodieke input-stimulus en de respons konden karakteriseren. Vervolgens pasten ze deze techniek toe in experimenten met drukreceptoren op de huid van het klassieke laboratoriumdier, de rat. Op deze wijze toonden zij aan dat ruis ook de respons van een sensorische zenuwcel op een zwak aperiodiek input-signaal kan vergroten. Het verschijnsel van aperiodieke stochastische resonantie is inmiddels ook bij zenuwcellen van krekels experimenteel aangetoond (Levin & Miller, 1996). Deze resultaten steunen het idee van een mogelijk functionele rol van externe input-ruis in sensorische systemen, aldus Collins e.a. Dit maakt onderzoek naar kunstmatige toevoeging van ruis aan sensorische zenuwcellen om hun gevoeligheid voor zwakke signalen te vergroten, buitengewoon interessant. Het vervolg van dit artikel gaat hier verder op in.



Figuur 3. Model voor de menselijke lidmaatcoördinatie, ontleend aan de locomotie van de kakkerlak.

RATIONALE VOOR ERGONOMISCHE TOEPASSING

Ondanks reserves is het gebruik van achtergrondruis ter verbetering van de signaal/ruis-verhouding bij de mens een poging tot onderzoek zeker waard. Zenuwcellen ontvangen vaak zowel random- als deterministische signalen. Elk organisme dat om te overleven neurale signalering nodig heeft, is er zonder meer mee gebaat dat het sensorisch systeem signalen zo tijdig mogelijk opvangt. Juist de ouder wordende mens, die vaak te kampen heeft met verhoogde waarnemingsdrempels, kan met achtergrondruis zijn voordeel doen.

Verminderd functioneren van het zenuwstelsel wordt gekenmerkt door verhoogde sensorische drempels, resulterend in niet-responderen of verlaagde vuurfrequentie in de sensorische zenuwbanen. Toevoeging van achtergrondruis aan een neurale signaal dat door ouderdom beneden de sensorische drempel raakt, vergroot de vuurfrequentie in de zintuigreceptoren. Mutatis mutandis geldt hetzelfde voor de mens die in zijn zintuiglijk functioneren is gehandicapt.

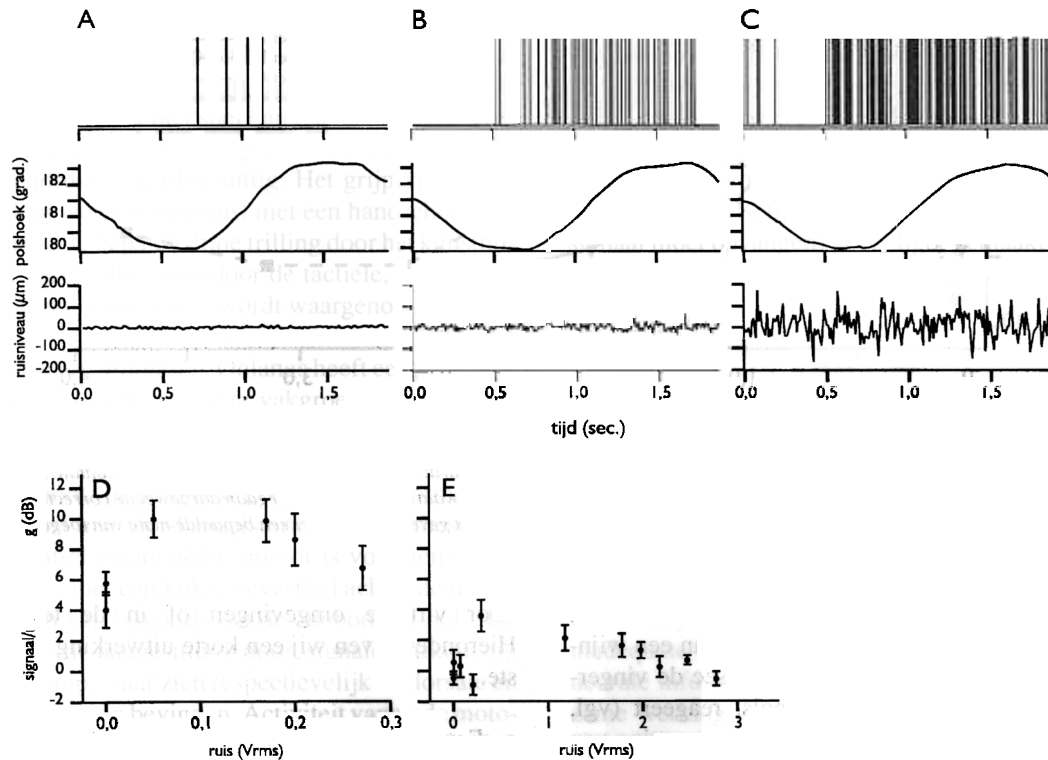
Het doel van dit artikel is niet een volledige schets te geven van de schier onbeperkte mogelijkheden van nuttige achtergrondruis bij onderdrempelige signalen. Wel zullen we pogen voor de verschillende zintuigen waar-

mee de mens is toegerust, aanknopingspunten in de informatieoverdracht te vinden voor (profijtelijke) ruis-toediening. Voorop staat dat naar ergonomische toepassing wordt gezocht in de precaire situatie dat het neuro-naal signaleringsvermogen tekort gaat schieten.

Tastzin

EEN VIERTAL UITWERKINGEN

a. *Handhaven van evenwicht bij locomotie.* Een momenteel gangbaar model van locomotie in de menselijke motoriek is ontleend aan de gang van de kakkerlak. Figuur 3 geeft daarvan een schematisch overzicht. In het model wordt ervan uitgegaan dat de extensor (het sta-been) voortdurend wordt geëxciteerd door centrale zenuwcellen. Gedurende de excitatieperiode is de activiteit van de flexor (het opzwaai-been) geïnhibeerd. Flexietijd blijft min of meer constant, alsof er een schakelklok is die zorgt dat de neuronendoor voor de flexor-excitatie gedurende een vaste periode open is en dan weer dicht. Zie voor een verdere uiteenzetting van dit neurologisch model voor locomotie, Rosenbaum (1991, p. 131).



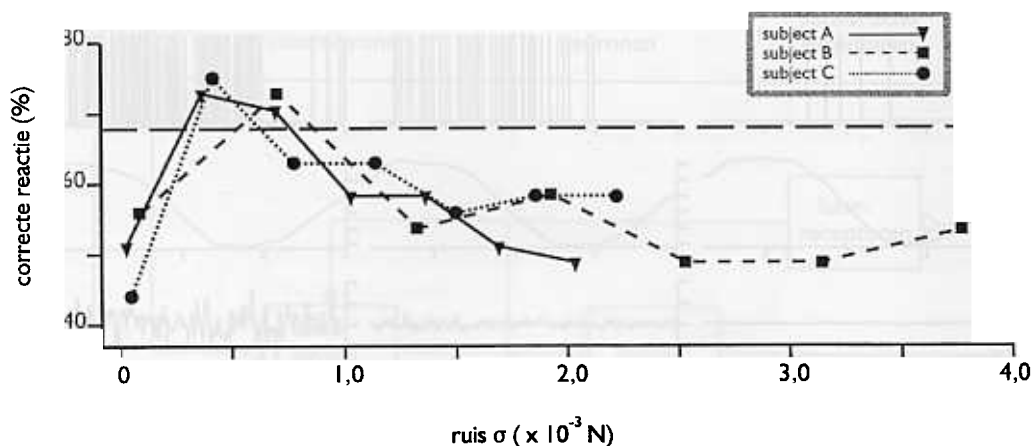
Figuur 4. Representatieve twee-seconden-samples van afferentresponsies en input-signalen voor drie verschillende condities (A+B+C) en signaal/ruis-verhoudingen voor twee verschillende subjecten (D+E). Bij condities A, B en C representeren de onderste figuren respectievelijk mechanische ruis (μm) met geen, matige en hoge intensiteit, toegediend aan de pees van de strekspier. De middelste figuren tonen de (gemanipuleerde) sinusoidale rotatiehoek van de pols. De bovenste figuren bij A, B en C tonen het signaal afgegeven door een enkele spierspoelafferent. De diagrammen D en E ten slotte laten de signaal/ruis-verhouding als functie van toegevoegde elektrische ruis (Vrms) zien, gemeten bij een enkele spierspoelafferent. Subject D is een gewone proefpersoon. Subject E is een proefpersoon bij wie, door middel van een verdoving van de brachiale plexus, de werking van de fusimotorische huidreflex onderdrukt is.

Druk(mechano)receptoren aan het lidmaat oefenen invloed uit op de activiteit van de spieren tijdens locomotie. Stel dat er een oneffenheid in de weg is. Het scenario is dat drukverandering op de mechanoreceptoren in de voetzool wordt opgemerkt. Dit leidt tot een verlengde extensor-reactie, alsof men zich probeert te verzekeren van vaste grond. Gebeurt dit niet, dan verliest men zijn evenwicht en een valpartij is het gevolg. Volledigheidshalve voegen we er aan toe dat er een terugkoppeling naar de schakelklok op de flexorpoort moet zijn opdat de klok even stilstaat, want het opzwaai-been mag niet door blijven zwaaien.

Het zal duidelijk zijn hoe vitaal de gevoeligheid van mechanoreceptoren bij locomotie is. De suggestieve strekking van dit betoog is dat het nadeel van een verhoogde drempel van de drukreceptoren voor een (zwak) periodiek signaal tenietgedaan kan worden door toediening van achtergrondruis (bescheiden 'toevallige' vibratie in schoeisel?).

Mutatis mutandis geldt het nut van achtergrondruis te-

vens bij een verhoogde drempels van pees- en spierspoelreceptoren, die de 'rek' van respectievelijk pees en spier indiceren. Moss en Wiesenfeld berichtten ons (persoonlijke mededeling) dat hun voortgangsstudies zich momenteel richten op de achillespees. Bewijs voor het positieve effect van ruis op de spierspoel is al recentelijk geleverd door Cordo e.a. (1996) in een proef waarin de pols van een proefpersoon door een apparaat werd gerooteerd, in een sinusvorm van lage amplitude. Daardoor begonnen spierspoelreceptoren van de strekspier, die gevoelig zijn voor uitrekking van de spier, regelmatig zwakke signalen af te geven. Een vibrator op de pees van deze spier zorgde vervolgens voor witte ruis bij de signalen. Metingen maakten duidelijk dat hierbij inderdaad stochastische resonantie optrad. De gevoeligheid van de spierspoelreceptor voor het zwakke polsbewegingssignaal nam toe tot bij een optimale hoeveelheid ruis. Bij meer ruis verdween het signaal (zie figuur 4 voor de parameterwaarden van input en ruis).



Figuur 5. De percentages correcte respons als functie van toegevoegde ruis standaarddeviatie σ bij drie subjecten. De horizontale stippellijn geeft het significantieniveau ($p < 0,05$) aan, welke is vastgesteld met een binomische test waarbij ervan uit is gegaan dat zowel de correcte als incorrecte respons in beide gevallen even waarschijnlijk zijn. De waarden boven de stippellijn geven aan dat met een bepaalde mate van toegevoegde ruis de waarschijnlijkheid van een correcte respons boven dit kansniveau uitstijgt.

b. *Reflexieve correcties – het wijnglas-effect.* Huidreceptoren ‘voelen’ het wegslijpen van een wijnglas, waarna met een latentie van 60 msec de vinger-musculatuur, aangestuurd vanuit pols, reageert (vgl. Schmidt (1988, p. 175-176) voor een samenvatting van Johansson & Westling (1984) en Westling & Johansson (1984)). De vingers sluiten zich rond het wijnglas voor het uit de hand glijdt. Musculatuur vanuit de pols blijkt binnen een fractie van een seconde geactiveerd te zijn door voor vibratie ontvankelijke huidreceptoren. Dit is de fusimotorische huidreflex. Om het glas dat dreigt te vallen op te vangen, wordt door extensie en flexie van armspieren tevens de hoek van het ellebooggewricht (scharnier) direct vergroot.

Het hoeft geen betoog dat snelheid van detectie door huidreceptoren hierbij belangrijk is; bij te trage detectie is er bovendien nog de compensatoire reactie van te hard grijpen.

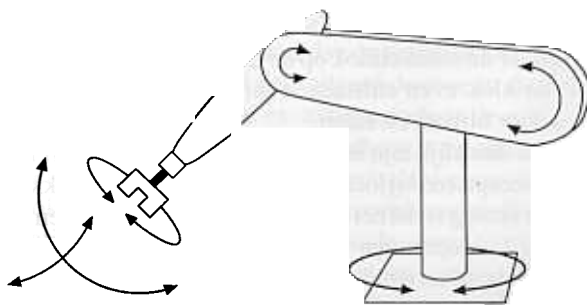
In een onderzoek van Collins e.a. (1996) werd de gevoeligheid onderzocht van de top van de middelvinger voor onderdrempelige stimuli. Ook hier werd stochastische resonantie vastgesteld. Onder invloed van een zekere mate van ruis verbeterde het voelen van de stimulus (zie figuur 5 voor de parameterwaarden van stimuli en ruis).

Mogelijk kan dus het nadeel van een verminderde gevoeligheid van de huidreceptoren door achtergrondruis deels worden ondervangen, bijvoorbeeld via bescheiden vibratie in een handschoen. In hun artikel deden Collins e.a. de suggestie om een op ruis gebaseerde techniek toe te voegen aan het ontwerp voor haptische interfaces

voor virtuele omgevingen of in de tele-robotica. Hieronder geven wij een korte uitwerking van dit laatste.

c. *Een uitstapje naar tele-robotica.* Iedereen is vertrouwd met het monster van Frankenstein, zoals (in 1817) oorspronkelijk gecreëerd door Mary Shelley, de vrouw van de dichter. Als alle monsters heeft dit schepsel een gevoelig hart dat week wordt wanneer het een klein onschuldige ogend meisje op zijn pad ontmoet. Het monster pakt het wichtje op. Zijn vingers omknellen reeds het breekbare halsje...

De robot kent een systeemtraagheid vanwege de Corioluskrachten. Daarnaast is er traagheid vanwege de massa van de robot en vanwege de soms tegengestelde bewegingen van de onderdelen van het mechanisch stelsel. Het gevolg is dat de scharnierwerking via de elleboog te laat in gang komt om, in het voorbeeld van het wijnglas, alsnog het wijnglas op te vangen (figuur 6).



Figuur 6. Schematische afbeelding van een industriële robot.

Compliantie (meegaandheid in plaats van stijfheid) van de gripper is van belang opdat het op te pakken en soms fragiele object behouden blijft (Schomaker, 1988). Als het ellebooggewricht niet snel kan reageren, is een adequaat reagerende 'huid-receptor' van extra belang. Achtergrondruis is daarbij nuttig. Het grijporgaan van de robot kan worden toegerust met een handschoen die een nog nader te bepalen, fijne trilling door het kunstlidmaat laat gaan (ruis), waardoor de tactiele, nog onderdrempelige stimulus eerder wordt waargenomen.

d. Besturing van prothesen. Onlangs heeft een groep enthousiaste studenten van onze vakgroep zich gebogen over de vraag of toevoeging van externe ruis het gemak van de besturing van myo-elektrische armprothesen (MEP) vergroot. In de meest geoutilleerde vorm is de MEP uitgerust met vier-kanaalsturing. De prothese, die van een relatief zware elektromotor is voorzien (in de handholte), is met een koker bevestigd achter de uitstekende botten van bijvoorbeeld de elleboog of pols. De prothese wordt aangestuurd door signalen afkomstig vanuit de stomp, waar zich respectievelijk de dorsale en ventrale spiergroep bevinden. Activiteit vanuit de motorische cortex zorgt voor buiging en strekking van de skeletspieren door aanspanning van respectievelijk de flexor en extensor.

In de MEP bevinden zich twee relais (schakelaars) die reageren op een verschil van respectievelijk 10 en 16 millivolt in spierspanningspotentiala. Van groot belang is dat de huid om de stomp de spiersignalen uit de motorische cortex naar de dorsale en ventrale spiergroep voldeende geleidt om de aftaster van de MEP te laten reageren. Wanneer de drager van de prothese de spieren van het antagonistenvaar ongelijk aanspant, maar het verschil van 10 millivolt wordt niet gehaald, dan blijft de motor uitgeschakeld. Bij een verschil tussen 10 en 16 millivolt wordt de motor ingeschakeld en sluit de hand. Wanneer het verschil de grens van 16 millivolt overschrijdt, gaat de tweede schakelaar van de motor over en zal de pols roteren. Een probleem bij prothesegebruikers is enerzijds het afzonderlijk aanspannen van flexor en extensor, en anderzijds de gevoeligheid van de kunstmatige sensor.

In principe lijkt het volgende mogelijk ter vermindering van deze problemen. Door toevoeging van externe ruis op de huid om de stomp onder een van beide sensoren van de prothese (aftaster van de spierpotentiala), wordt het differentiële spiersignaal opgewerkt, zodat eerder de verschildrempel wordt bereikt om het relais te bedienen. Een alternatief is om door middel van ruistoefvoeging het relais eerder werkzaam te maken, analoog aan het

functioneren van de schakelaar voor richtingsomkeer van laserlicht in het eerder genoemde lichtcircuit. Wat de werkgroep (onder wie een prothesedraagster) voorstelde, is door ruistoefvoeging de huidgeleiding te verbeteren en daardoor de signaaltransmissie door de huid heen te vergroten. De relatief dikke of minder gevoelige huid wordt plaatselijk (daar waar de elektrode het spiersignaal moet opvangen) gevoeliger gemaakt door ruis.

Oog

VERLIES OVER LEEFTIJD

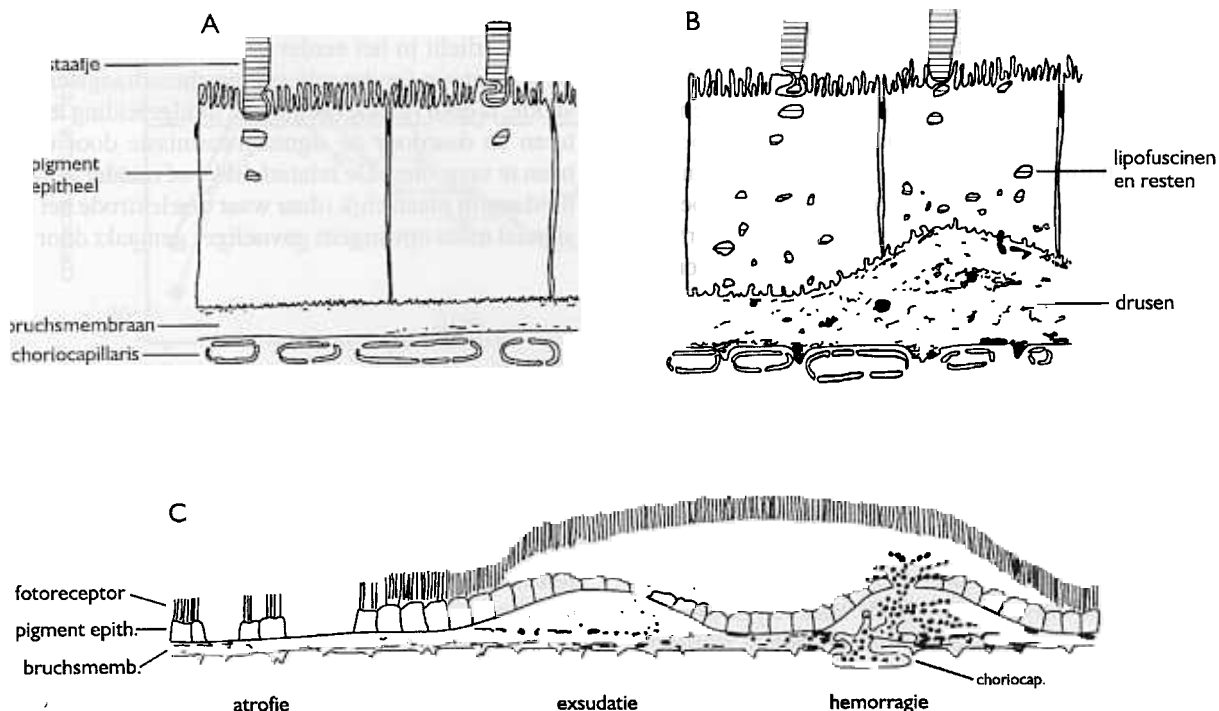
Zoals het geval is met overige zintuigfuncties neemt de capaciteit van het oog sterk af als functie van leeftijd. In de zicht/leeftijd-functie moet onderscheid worden gemaakt tussen verminderd gezichtsvermogen door perifere deficiënties (lensfragmentering (staar); afname van lensflexie; lensaberraties; verminderde accommodatie; inadequate bewegingen van het oog) en verslechterde neurale informatieoverdracht. Dit artikel, over de heilzame werking van ruis op neuronaal signaleren, richt zich qualitate qua op het laatste tekort.

Licht wordt na inwerking op het fotopigment-molecuul omgezet in een elektrochemisch signaal. Dit gebeurt in de fotoreceptoren van de retina. Licht van een zekere golflengte zorgt ervoor dat het lichtgevoelige fotopigment-molecuul van de receptor niet langer stabiel blijft. Er treedt vormverandering op (isomerie) als gevolg waarvan het elektrisch stroomveld in en rond de fotoreceptor verandert.

Een grove indeling is te maken tussen fotoreceptoren die verantwoordelijk zijn voor het kleurenzien (de kegeltjes) en fotoreceptoren die achromatisch zijn (de staafjes). Er bestaan drie soorten kegeltjes, elk verantwoordelijk voor een golflengtegebied, te weten: de korte golflengten (420 nanometer), de middengolven (530) en de lange golflengten (560) van licht. Complicerend is dat de drie soorten kegeltjes elk een eigen drempelwaarde hebben.

Anatomisch gezien bestaat de retina uit diverse lagen neuronen (Pirenne, 1971). Eerst bereiken de elektrische signalen de bipolaire laag, met onder meer orthogonale vertakkingen naar de zogeheten horizontale cellen en amacrine cellen. Dan wordt de informatie verzameld in collector- ofwel ganglioncellen en ten slotte wordt deze informatie via de optische zenuw doorgegeven aan het brein.

Met veroudering treedt een interactie op van diverse veranderingen op het vlak van de retina. In de eerste



Figuur 7. Stadia van degradatie van de retina. A geeft een schematische afbeelding van een gezonde retina. In B zorgen Drusen in de macula voor een epitheelverdunding en wordt het pigment vervuild door vetdeeltjes. In C worden ten slotte drie oorzaken van retinadegradatie, te weten atrofie, exsudatie en hemorragie, schematisch weergegeven.

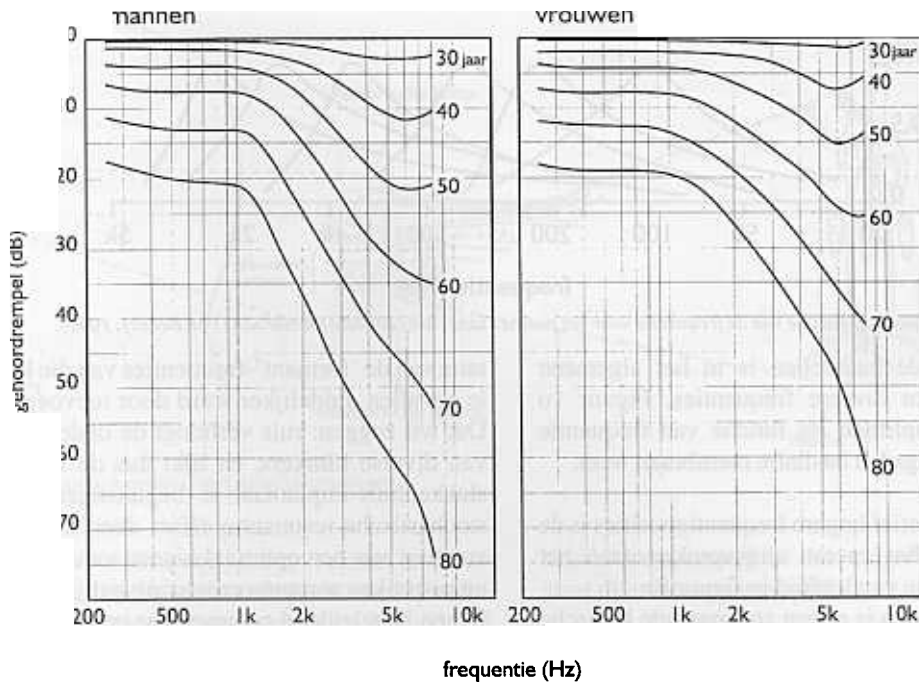
plaats wordt de retina dunner, als gevolg van een progressief verlies van neuronen als functie van leeftijd; in het bijzonder van de staafjes. Verder verslechtert de ondersteuningsstructuur zoals het bloedvatstelsel en wordt het retinale pigment epitheel ten behoeve van de stofwisseling dunner. Van belang is ook dat in de macula kleine verwondingen (zgn. Drusen) ontstaan die hun negatieve invloed progressief doen gelden bij verdunning van het retinale pigment epitheel. In figuur 7, ontleend aan Marmor (1982), wordt het samenspel van verslechterd functioneren van bloedvaten, epitheelverdunding en werking van Drusen inzichtelijk. Ten slotte vermindert de efficiëntie van de synaptische transmissie met het toenemen van de leeftijd.

Uiteenlopende oogfuncties worden derhalve aangetast, zoals kleurenzien, aanpassing aan het donker, visuele scherpte en helderheidscontrast.

ACHTERGRONDRUIS

Gegeven het complexe karakter van de achteruitgang van de oogzenuw met de jaren, lijkt het vooralsnog niet doenlijk om door middel van toevoeging van achter-

grondruis specifiek in de neurale informatietransmissie tussen receptorcellen en visuele cortex in te grijpen. Wel is het denkbaar om ruis tijdens de presentatie van visuele signalen op beeldschermen aan de achtergrond toe te voegen. Als dat stochastische resonantie oplevert, zou dat ook bijvoorbeeld piloten behulpzaam kunnen onder slechte weersomstandigheden. Simonotto (zie Lipkin, 1996) deed hier onderzoek naar. Hij maakte een gedigitaliseerde foto onderdrempelig en voorzag deze vervolgens van achtergrondruis. Ruis werd in dit geval bewerkstelligd door toevoeging van een random-getal aan elke pixel; het maakte de foto plotseling herkenbaar. Tevens poogde hij, met succes, door dynamische ruis aan te bieden het visuele onderscheidingsvermogen van de waarnemer te vergroten. Hij deed dat door dezelfde foto steeds van een iets andere ruis (nieuwe random-getallen) te voorzien en de foto's als een film af te draaien. Dit maakte het beeld nog duidelijker. Men bedenke echter dat het oog zelf over de capaciteit beschikt dynamiek aan het beeld toe te voegen, in de vorm van de aan de oogwerking inherente tremor. Beide ogen bewegen voortdurend en onafhankelijk van elkaar, met een minuscule amplitude (van de diameter van een kegeltje) met een (90 Hz-)frequentie, een waarde die overigens



Figuur 8. Mediaan-audiogram als functie van leeftijd voor mannen en vrouwen (Spoor, 1967).

niet constant over leeftijd is. De functie van de tremor is afwisseling te bewerkstelligen in de werking van de lichtgevoelige fotopigment-moleculen, die voortdurende uitbleking ondergaan. De amplitude van de tremor moet zeer gering zijn opdat het te inspecteren object (beeld) binnen de foveale hoek van maximaal 2 graden blijft.

Gegeven de oogboldynamiek is het van belang te onderzoeken wat de optimale hoeveelheid ruis in termen van amplitude en dichtheid zal zijn ten behoeve van het (opwerken van het) onderdrempelige visuele signaal. Met betrekking tot individuele verschillen in de mate van verslechtering van het oogzintuig en de juiste dosering van ruis, wordt verwezen naar de behandeling van ruistoevoeging aan de auditieve modaliteit (zie volgende paragraaf).

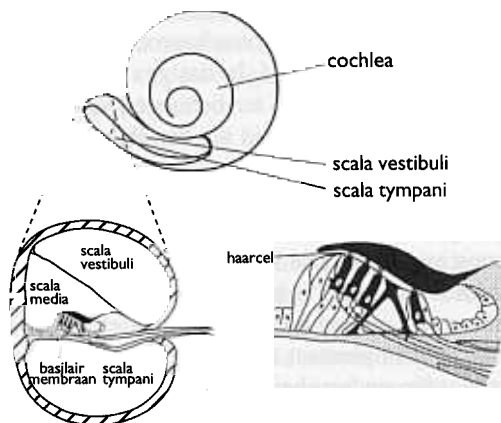
Oor

VERLIES OVER LEEFTIJD

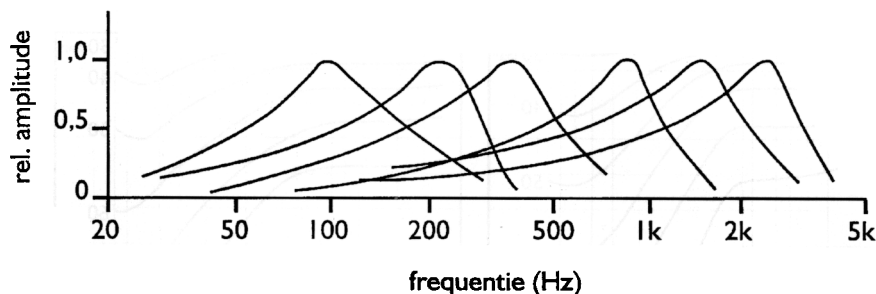
Het gehoorverlies over leeftijd is aanzienlijk – zij het dat de teruggang bij mannen opmerkelijk groter is dan bij vrouwen, zoals figuur 8 laat zien. Is er iets te doen aan de sluipende drempelverhoging? Jazeker, door adequate toediening van achtergrondruis – eventueel te effectu-

eren door met een ‘device’ of aan een prothese een lichte trilling aan het gehoororgaan in het gebied van middenoorbeentjes tot en met slakkenhuis mee te geven.

Luchtdrukvariaties brengen het trommelvlies in trilling. Middenoorbeentjes dragen de trillingen over op de perilymfe in het slakkenhuis. Het basilaire membraan dat de perilymfe afdekt, komt in trilling. Op dat membraan bevinden zich receptor-haarcellen ofwel het orgaan van Corti dat fysieke trilling in elektrochemische activiteit omzet (zie figuur 9).



Figuur 9. Slakkenhuis met dwarsdoorsnede en uitvergroting van het orgaan van Corti.



Figuur 10. Trillingsamplitude als functie van de frequentie voor zes posities langs het basilaire membraan (Von Békésy, 1960).

Gevoeligheid van de haarcellen is in het algemeen plaats-specifiek voor diverse frequenties. Figuur 10 geeft de trillingsamplitude als functie van frequentie voor zes posities langs het basilaire membraan weer.

Bij haarcellen op relatief hogere frequentieposities is de drempelverhoging het meest uitgesproken (zie het audiogram als functie van leeftijd in figuur 8). Rondom een vaste toon is er een zogenaamde kritische bandbreedte. Dit ruisspectrum zorgt, afhankelijk van het geluidsdruk-niveau, voor meer of mindere maskering van de grondtoon.

Tot 500 Hz heeft de kritische bandbreedte een waarde van 90 Hz. Bij hogere frequenties is de breedte een constant percentage van rond 20 procent, ofwel een derde octaaf (logaritmische schaal). Voorbeeld: 5000 Hz heeft een kritische bandbreedte van 1000 Hz, ofwel plus en min 500 Hz.

Verondersteld is dat de kritische band een directe afspiegeling is van de frequentie-analyse zoals deze door het basilaire membraan tot stand komt. Als ruwe maat kan men ervan uitgaan dat de kritische band met een afstand van 1,3 mm (gedefinieerd als 1 Bark langs het basilaire membraan overeenkomt, corresponderend met een veld van circa 150 (naburige) haarcellen.

Door ouderdom of ziekte sterven haarcellen en andere slakkenhuis-mechanismen af. In dat geval vervalt natuurlijk het voordeel van ruis ten behoeve van zowel individuele haarcel-gevoeligheid als bandbreedte. Dove mensen kunnen echter een slakkenhuis-implantaat krijgen dat rechtstreeks spatio-temporele elektrische prikkeling doorgeeft aan de zenuwvezels van het gehoorzintuig die nog intact zijn. Dat kan het gehoor ten dele herstellen. Morse en Evans (1996) deden onderzoek naar de effecten van ruis op een fysiologisch model van de respons van zo'n implantaat op het horen van klinkers. Klinkers worden onderscheiden aan de hand van spectraalpieken ('formants') op bepaalde frequentieposities. Morse en Evans constateerden in een test met vijf verschillende klinkers als stimuli, dat de neurale represen-

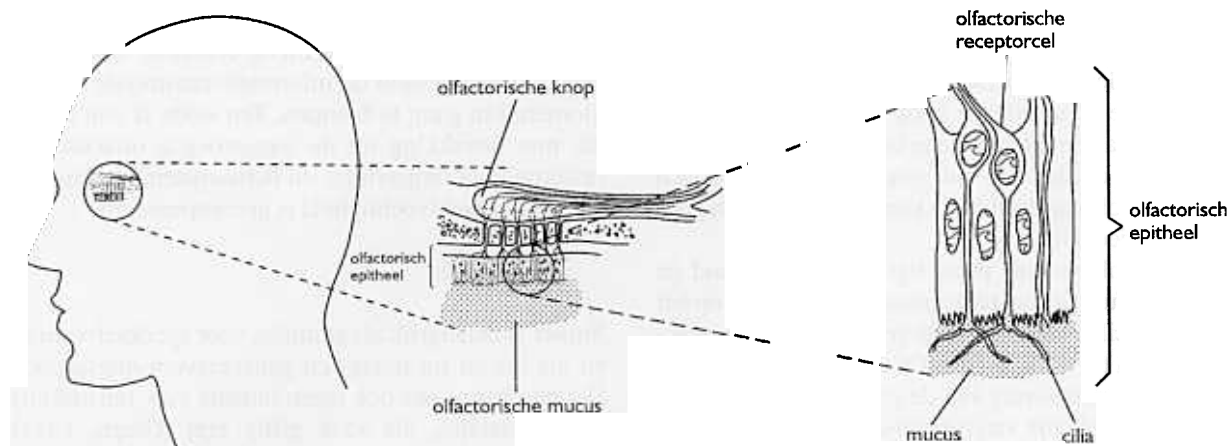
tatie van de 'formant'-frequenties van die klinkers in alle gevallen duidelijker werd door toevoeging van ruis. Dat wil zeggen: ruis verhoogt de onderscheidbaarheid van diverse klinkers, en lijkt dus de werking van het slakkenhuis-implantaat te begunstigen. Het typische stochastische-resonantie-effect deed zich hierbij weer voor: er was een optimaal niveau van ruis dat de meest uitgesproken responsverbetering gaf.

In een begeleidend commentaar op dit onderzoek melden Moss e.a. (1996) dat een recent eerste onderzoek bij mensen de resultaten van Morse en Evans steunt. Bij mensen met een 22-kanaals slakkenhuis-implantaat bleek de kanaaldiscriminatie inderdaad te verbeteren door toediening van extra geluidsstimuli.

ERGONOMISCHE TOEPASSING TEN BEHOEVE VAN SLECHTHORENDEN

Het is zeker waar dat het nut van achtergrondruis eenvoudig is te demonstreren in het auditieve domein. Garver en Moss (1995, p. 84-87) geven daarvan een treffend voorbeeld, zoals in de inleiding van dit artikel al even is aangestipt. Men speelt op een bandrecorder een stuk muziek af of biedt een sinustoon aan. Vervolgens wordt het geluidsvolume zover teruggedraaid tot de muziek onhoorbaar is. Via een tweede spoor wordt dan witte ruis toegevoegd. Gevolg: de muziek is terug. Voorbij een zeker punt in de geluidstoename van de ruisbron overheerst echter de ruis die de muziekwaarneming overstemt.

Toepassing van stochastische resonantie via een aangepast gehoorapparaat brengt echter nogal wat moeilijkheid met zich mee. Het gaat erom precies de juiste hoeveelheid ruis aan te brengen. Te weinig ruis heeft geen effect. Te veel ruis zorgt ervoor dat de signalen door overstemming teloorgaan. Er is een reeks factoren waarmee rekening gehouden moet worden wanneer men er toe overgaat een gehoorapparaat te fabriceren dat nuttige ruis toevoegt. In de eerste plaats is de optimale hoeveelheid ruis per persoon ongelijk. Wat voor de een toe-



Figuur 11. Het olfactorisch epitheel met detailvergrotingen.

reikend is, blijkt voor de ander juist te veel; dat is afhankelijk van de restgevoeligheid van het oor van de (oude-) persoon. Elk gehoorapparaat moet dus individueel worden afgesteld, waarbij de gebruiker uitgebreid moet worden getest om het apparaat op de juiste dosis ruis af te stellen. Loopt met de leeftijd de gevoeligheid verder terug, dan zal opnieuw een testprocedure noodzakelijk zijn. Uiteenlopende restcapaciteit tussen mensen maakt het ontwerpen van uniforme apparatuur voor het oor risikant. Ten tweede ontvangt het oor een variabele hoeveelheid omgevingsruis, hetgeen inhoudt dat soms de ruis al zo sterk is dat extra toevoeging niet nodig is. Overstemming door ruis is snel geschied. Om de variabiliteit van omgevingsruis te minimaliseren, moet het apparaat toegerust zijn met een subtractief filter dat de hoeveelheid ruis reguleert naar precies de juiste dosis. Anderzijds, omgevingsruis kan spectraal beperkt zijn, zodat voor diverse frequentiespectra gecompenseerd zou moeten worden. Bij te weinig ruis moet de specifieke hoeveelheid ruis worden aangepast. De werking van de ruisregulator zou in principe volgens een terugkoppelingslus kunnen plaatsvinden, zoals bij een thermostat. Men denke aan een microfoon die signalen ontvangt, deze filtert of verruist, waarna het geluid wordt doorgegeven aan een luidspreker dat zich in het oor bevindt.

Een bijzonder hinderlijke omstandigheid vormt de ruis van kleding. Men zou uit kunnen gaan van gehoorapparatuur die op dat vlak storingvrij is, zoals gehoorapparaten die in een brilmontuur zijn aangebracht.

Samenvattend: het 'ruisige' gehoorapparaat moet in staat zijn ruis waar te nemen, en vervolgens de ruis te vergelijken met de gewenste hoeveelheid. Ten slotte moet het ruis kunnen afdempen of toevoegen tot de op-

timale dosis, terwijl zo min mogelijk 'contact' ruis ontstaat door het apparaat zelf.

Reuk

Hoewel vruchtbare toepassing van achtergrondruis aan de reukzin tot de mogelijkheden behoort en een voorstel daartoe in dit artikel zal worden gelanceerd, lijkt het niet eenvoudig om ten behoeve van verbeterde werking van het zintuig tot ergonomische applicatie over te gaan.

Het is echter aannemelijk te maken dat de reukzin de ruimte biedt om de werking van achtergrondruis bij neurale signalering te testen. Ook voor dit zintuig geldt dat in de informatietransmissie tussen reukorgaan en olfactorisch brein haartrilling een kardinale rol vervult. Anders dan bij de oor-en oogzenuw is afname van reukzin bij het ouder worden eerder te wijten aan de verhoogde waarnemingsdrempel dan aan definitief verlies van neuronen. Verminderde reukzin is bij ieder bekend in geval van neusverkoudheid wanneer de met slijm gevulde neusholte de doorgang van reukprikkelers naar hogere centra belemmert.

Receptorcellen van het reukorgaan zitten in de neusholte. Boven in de neusholte bevindt zich een membraan ofwel het olfactorisch epitheel (zie figuur 11), waarin zich, in de vorm van toefjes haar, zo'n tien miljoen geurreceptoren bevinden. Deze trilhaartjes worden cilia genoemd (vgl. Sekuler & Blake, 1985). De receptorcellen van de cilia zijn bipolaire neuronen die met het cellichaam geworteld zijn in de mucus (slijmvlies om het epitheel), zoals het rechterpaneel van figuur 11 weergeeft. Aan de bovenzijde van de cilia bevinden zich axonverbindingen naar de olfactorische knop.

Geurmoleculen binden zich bij geurwaarneming aan de

cilia, als gevolg waarvan de cilia in trilling geraten (vgl. Shepherd, 1994). Deze reactie leidt tot het optreden van actiepotentialen. Elektrische signalen worden via de axons aan de olfactorische knop doorgegeven. Via de bovenzijde van de olfactorische knop (de zgn. glomeruli) vervolgen de signalen hun weg naar het olfactorisch brein. In het olfactorisch brein komen signalen van geur en smaak bijeen.

Voor een denkbeeldige proef ligt het voor de hand de achtergrondruis aan het reuksignaal toe te voegen op het vlak van de cilia – daar waar de geurmolecuul een reactie in de cilia tot stand brengt. Of de geurmolecuul contact met een receptorcel van de cilia aangaat, is echter ten eerste afhankelijk van fysisch-chemische wetmatigheden. Zo moeten de geurmoleculen zijn opgenomen in het slijm van het olfactorisch epitheel, de mucus, waarbij als voorwaarde geldt dat de mucus een zekere zoutwaarde en een neutrale pH-waarde ($\text{pH} = 7$) moet hebben voor gegarandeerde opname. Daarbij moet de beweging van de moleculen een zekere waarde overstijgen die verband houdt met de warmte en de druk in mond en neusholte.

In de tweede plaats is het aantal moleculen van belang, dat bepaalt of überhaupt geur wordt waargenomen. Dit geldt evenzeer als het een fysiologisch gegeven is dat het aantal geactiveerde cellen van de cilia bepalend is voor de intensiteit van de gewaarwording van een geur. Als ruisbron kan een onderdrempelig aangeboden compilatie van alle basisgeuren dienen die maakt dat de signaalgeur als het ware boven de waarnemingsdrempel wordt uitgetild. Stel dat de cilia pas informatie aan de glomeruli doorgeven wanneer tien receptorneuronen exciteren, en dat de zwakke geur slechts zeven neuronnen activeert. Door toevoeging van ruis zouden bij een te lage score van zeven neuronnen drie extra ciliacellen door het geursignaal worden geactiveerd, die er tezamen voor zorgdragen dat de waarnemingsdrempel voor het geursignaal wordt bereikt.

HYPOTHETISCHE TOEPASSING VAN ACHTERGROND RUIS TEN BEHOEVE VAN REUK

Een toepassing van olfactorische achtergrondruis zou kunnen zijn dat elke neusholte een minieme container bevat. Deze is gevuld met vloeistof waarin alle basisgeuren zijn opgenomen die de mens in zijn reukspectrum beheerst. Een verwarmingselement brengt de vloeistof op zekere temperatuur (druk), die wat de olfactorische detectie aangaat echter juist onder de drem-

pel van geurwaarneming blijft. Het onderdrempelige niveau van de reukvloeistof uit de container mag niet in staat worden gesteld de informatietransmissie naar de glomeruli in gang te brengen. Ten slotte is van belang dat met betrekking tot de toegevoegde olfactorische ruisbron voor omgevings- en lichaamstemperatuur alsmede voor luchtvochtigheid is gecompenseerd.

Smaak

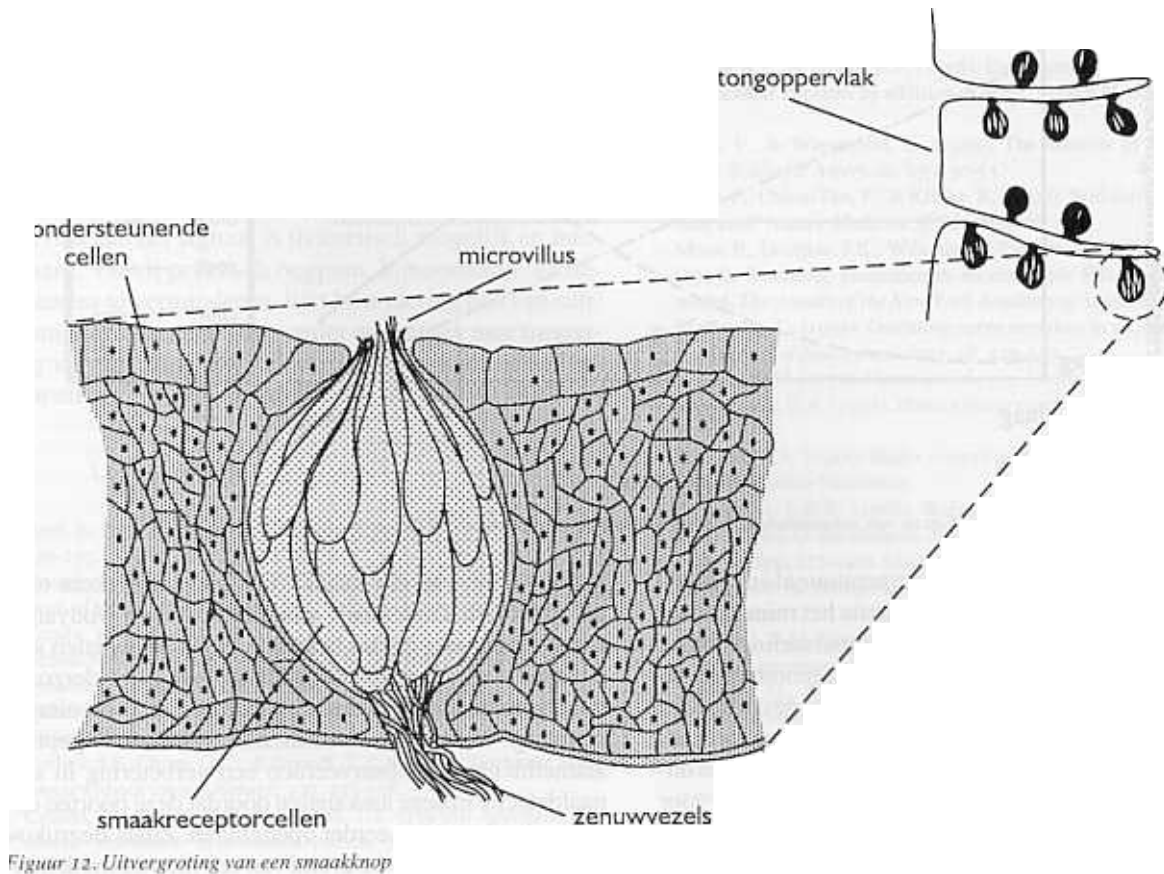
Smaak is belangrijk als stimulus voor speekselvorming en als aanzet tot maag- en pancreasverteringssappen. Het beschermt ons ook tegen inname van 'onsmakelijke' substanties, die vaak giftig zijn (Green, 1972). Smaakzin is bij de mens gezeteld in de blad- en paddestoelvormige papillen die zich voornamelijk op de tong bevinden. Opmerkelijk is dat de receptorcellen, gebundeld in smaakknoppen en gesitueerd aan de rand van de smaakpapillen, voortdurend degenereren en na een gemiddelde levensverwachting van enkele weken worden vervangen terwijl constantie van smaakindruk behouden blijft. Men kan zich voorstellen dat partiële de- en regeneratie van de cellen over het gehele receptorsysteem van de smaakzin is uitgespreid. Wel is bewezen dat met de leeftijd (v.a. het veertigste levensjaar) het aantal receptorcellen in absolute zin terugloopt.

Per papil loopt het aantal smaakknoppen uiteen van nul tot honderden; in totaal zijn er ongeveer tienduizend smaakknoppen die, met uitzondering van het centrale gedeelte, over de tong zijn verspreid. Met andere woorden, het centrale deel van de tong is smaak-'blind'.

Een smaakknop telt rond de vijftig smaakreceptorcellen, gearrangeerd als de schillen van een ui. Zoals figuur 12 illustreert, spruit boven uit de 'ui' een dunne, draadachtige structuur (microvilli), die de aanwezigheid van chemische substantie registreert die zich bevindt in de speekseloplossing.

Slijmachtige secreties van steuncellen (zie figuur 12) voeren de oplossing weg uit de omgeving van de smaakknop. Dit is te beschouwen als reinigingsactie en gereedmaking voor het opdoen van nieuwe smaakprikkelers. De activiteit van een smaakreceptor is kortdurend. Er is dus voortdurend smaakvervlakking, zodat we vrij snel in staat zijn een nieuwe smaak te detecteren en te identificeren.

Van belang is de opmerking dat anders dan bij olfactorische informatietransmissie, smaakreceptoren niet over trilhaartjes en axons beschikken. Ze werken op een analoge wijze als de fotoreceptoren van de retina waar che-



Figuur 12: Uitvergroting van een smaakknop

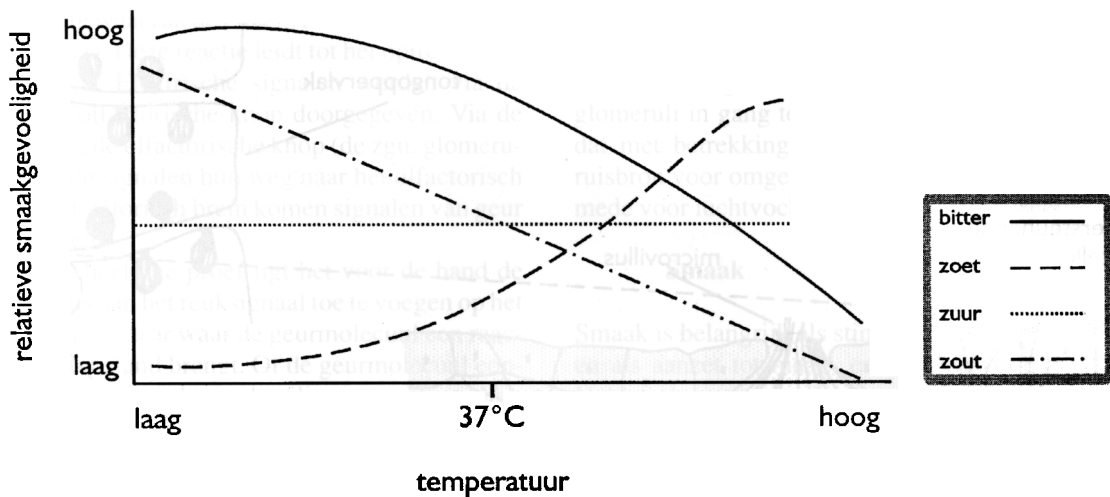
mo-elektrische omzettingen plaatsvinden. Anders gezegd: binnen in de smaakknop treden elektrische stroomveld- en potentiaalveranderingen op.

Aan de onderzijde van de smaakknop vervolgen de elektrisch gecodeerde boodschappen hun weg naar buiten via zenuwvezels die met het brein zijn verbonden. Er zijn drie onderscheiden craniale zenuwen, die door een en dezelfde smaakknop worden bediend. Aldus komt in het brein smaakinformatie via diverse communicatiekanalen binnen.

Op basis van een oude indeling naar specifieke en plaatsgebonden receptorcellen op de tong gaat men van vier basissmaken uit, te weten zoet (achter de tongpunt), bitter (achterop de tong), zuur (zijkant achter) en zout (tongpunt en verspreid). Doorgaans ervaart men een combinatie van deze indrukken (Erickson, 1984). De moderne zienswijze houdt het er op dat men de basissmaken individueel kan ervaren, alsmede de respectieve bijdragen daarvan in een complexe smaakgevoelens (McBurney, 1974).

Deze zienswijze vindt ondersteuning door drempelonderzoek van Pfaffmann (1955), die vond dat een receptorcel het meest gevoelig is voor een bepaalde smaak. Daar voegt de kruisvezel-theorie ('cross-fiber') aan toe dat, hoewel neuronen selectief reageren op smaaksustanties, de meeste neuronen responderen op verscheidene smaakstimuli. De differentiële respons impliceert dat voor een gegeven zenuwvezel informatie over smaakwaliteit wordt gecodeerd door een activiteitenpatroon binnen een samenstelsel van vezels, zoals de kruisvezeltheorie veronderstelt (Axel, 1995).

Naast hun uiteenlopende kwaliteit, variëren de smaken in intensiteit, afhankelijk van de concentratie van de smaaksustantie die men proeft. Vuurfrequentie hangt dus af van de concentratie van stimulerende oplossing. Met betrekking tot de gewaarwordingsdrempel bij proeven is het van belang onderscheid te maken tussen identificatie (wat proef je?) en detectie (proef je iets?). In het laatste geval ligt de drempel veel lager. Detectie is direct afhankelijk van de temperatuur van de sustantie. De invloed die temperatuur op de variëteit van smaak uitoefent is weergegeven in figuur 13.



Figuur 13. Smaakgevoeligheid als functie van substantietemperatuur voor diverse smaken.

Met een gemiddelde lichaamstemperatuur als uitgangspunt, is de smaak van zurige substantie het minst gevoelig voor temperatuur en temperatuurwisseling. Bitter (en ook zout) wordt gemakkelijker waargenomen bij lage, en zoet bij hoge temperatuur. Smaakgevoeligheid voor de diversiteit van smaaksubstanties is dus sterk afhankelijk van temperatuur, wat het moeilijk (zo niet onmogelijk) maakt een aanknopingspunt te vinden voor toevoeging van achtergrondruis aan de smaakzin.

TOEPASSING VAN ACHTERGRONDRIJS BIJ SMAAK?

Iedereen kent de typische, zoutige smaak als gevolg van elektrische prikkeling van de tong met zwakstroom. De stap van dit speciale geval van 'ruis' toediening naar het door middel van ruis verheffen van het gehele smaak-spectrum waarover de mens beschikt, lijkt moeilijk realiseerbaar. Variabele temperatuurgevoeligheid voor de diverse gebieden van de smaakzin, verspreid over de tong, is een volgende handicap.

Ten slotte is er bij smaak het probleem of er wel stochastische resonantie te verwachten valt, omdat smaakcellen geen neuronen zijn maar epitheelcellen die receptorpotentiaal-veranderingen ondergaan. De vraag is of stochastische resonantie wel werkzaam is bij gegradeerde potentialen, waarvan grootte en tijdsverloop lineair afhankelijk zijn van de stimulus of het signaal. Er lijkt immers geen sprake te zijn van een drempel. De stroom door membraanpoorten (ionkanalen) is echter niet alleen afhankelijk van het voltageverschil tussen beide zijden van de celmembraan, maar ook van het al dan niet

geopend zijn van dat kanaal. Dat laatste betekent toch een drempel. Onderzoek van Bezrukov en Vodyanoy (1995) toont aan dat bij bepaalde typen ionkanalen stochastische resonantie inderdaad optreedt. Zij onderzochten stochastische resonantie op het niveau van voltagegevoelige ionkanalen in celmembranen van de peptide alamethicine. Zij observeerden een verbetering in signaaldetectie in deze ionkanalen doordat deze poorten onder invloed van ruis eerder opengingen. Zoals Bezrukov en Vodyanoy (1997) op grond van een nieuwe modelmatige analyse, en ook Jung en Wiesenfeld (1997) onlangs concludeerden, is een duidelijke drempel voor het optreden van stochastische resonantie dus niet altijd nodig. Dat betekent dat in principe stochastische resonantie bij smaakcellen niet uitgesloten is. Verder onderzoek moet uitwijzen of het ook kan optreden.

Conclusie

In vogelvlucht hebben wij de zintuigen van de mens behandeld met het doel om ergens in de neurale informatieoverdracht een aangrijpingspunt te vinden voor nuttig gebruik van achtergrondruis. Achtergrondruis wordt gezien als een potentieel middel om stimuli die niet meer worden waargenomen (bijv. vanwege veroudering) en die toch vitaal zijn voor adequaat neuronaal functioneren, boven de waarnemingsdrempel te verheffen. Realistische en voor de hand liggende aangrijpingspunten doen zich voor op het tactiele domein. Hiervoor zijn vier toepassingen uitgewerkt. Baat van achtergrondruis voor het auditieve zintuig is zeker aantoonbaar, zij het

dat applicatie vanwege juiste dosering niet eenvoudig is. Enerzijds is er de noodzaak tot onderdrukking van bestaande ruisbronnen uit de omgeving en, anderzijds is er verschil in waarnemingsdrempels tussen individuen, zeker met het toenemen der jaren. Mutatis mutandis ontmoet het visuele systeem soortgelijke handicaps. Beïnvloeding van de reuk- en smaakzin door toevoeging van ruis aan het signaal is theoretisch mogelijk en interessant. Vanuit praktisch oogpunt, bijvoorbeeld om deficiënties te verminderen, lijkt bestudering hiervan echter minder belangrijk dan verder onderzoek naar toepassing van stochastische resonantie bij de tastzin, het gehoor en het gezichtsvermogen.

LITERATUUR

- Axel, R. (1995). The molecular logic of smell. *Scientific American*, 130-137.
- Bezrukov, S.M., & Vodyanoy, I. (1995). Noise-induced enhancement of signal transduction across voltage-dependent ion channels. *Nature*, 378, 362-364.
- Bezrukov, S.M., & Vodyanoy, I. (1997). Stochastic resonance in non-dynamical systems without response thresholds. *Nature*, 385, 319-321.
- Bulsara, A.R., & Gammaitoni, L. (1996). Tuning in to noise. *Physics Today*, March, 39-45.
- Collins, J.J., Chow, C.C., & Imhoff, T.T. (1995a). Stochastic resonance without tuning. *Nature*, 376, 236-238.
- Collins, J.J., Chow, C.C., & Imhoff, T.T. (1995b). Aperiodic stochastic resonance in excitable systems. *Physical Review*, E 52, R3321-R3324.
- Collins, J.J., Imhoff, T.T., & Grigg, P. (1996). Noise-enhanced tactile sensation. *Nature*, 383, 770.
- Cordo, P., Inglis, J.T., Verschueren, S., Collins, J.J., Merfeld, D.M., Rosenblum, S., Buckley, S., & Moss, F. (1996). Noise in human muscle spindles. *Nature*, 383, 769-770.
- Erickson, R.P. (1984). On the neural bases of behavior. *American Scientist*, 72, 33-241.
- Garver, W., & Moss, F. (1995). Detecting signals with noise. *Scientific American*, 273, 84-87.
- Green, J.H. (1972). *An introduction to human physiology*. London: Oxford University Press.
- Johansson, R.S., & Westling, G. (1984). Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. *Experimental Brain Research*, 56, 560-564.
- Jung, P., & Wiesenfeld, K. (1997). Too quiet to hear a whisper. *Nature*, 385, 291.
- Levin, J.E., & Miller, J.P. (1996). Broadband neural encoding in the cricket cercal sensory system enhanced by stochastic resonance. *Nature*, 380, 165-168.
- Lipkin, R. (1996). Digital noise sharpens vague images. *Science News*, 149, 196.
- Maddox, J. (1994). Bringing more order out of noisiness. *Nature*, 369, 271.
- Marmor, M.F. (1982). Aging and the retina. In R. Sekuler, D. Kline, & K. Dismukes (Eds.), *Modern aging research (Vol. 2)* (pp. 59-78). New York: Liss.
- McBurney, D.H. (1974). Are there primary tastes for man? *Chemical Senses and Flavor*, 1, 17-28.
- Morse, R.P., & Evans, E.F. (1996). Enhancement of vowel coding for cochlear implants by addition of noise. *Nature Medicine*, 2, 928-932.
- Moss, F., & Wiesenfeld, K. (1995). The benefits of background noise. *Scientific American*, 273, 50-53.
- Moss, F., Chiou-Tan, F., & Klinke, R. (1996). Will there be noise in their ears? *Nature Medicine*, 8, 860-862.
- Moss, F., Douglas, J.K., Wilkens, L., Pierson, D., & Pantazelou, E. (1993). Stochastic resonance in an electronic Fitz-Hugh-Nagumo model. *The Annals of the New York Academy of Sciences*, 26-41.
- Pfaffmann, C. (1955). Gustatory nerve impulses in rat, cat, and rabbit. *Journal of Neurophysiology*, 18, 429-440.
- Pirenne, M.H. (1971). *Vision and the eye*. London: Chapman & Hall.
- Rosenbaum, D.A. (1991). *Human motor control*. London: Academic Press.
- Schmidt, R.A. (1988). *Motor control and learning*. Champaign, IL: Human Kinetics Publishers.
- Schomaker, L.B.R. (1988). Robotica en menselijke motoriek. In P.J.G. Keuss, G. ten Hoopen, & A.A.J. Mannaerts (red.), *Menselijke motoriek* (pp. 117-140). Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Sekuler, R., & Blake, R. (1985). *Perception* (pp. 379-420). New York: Knopf.
- Shepherd, G.M. (1994). Discrimination of molecular signals by the olfactory receptor neuron. *Neuron*, 13, 771-790.
- Westling, G., & Johansson, R.S. (1984). Factors influencing the force control during precision grip. *Experimental Brain Research*, 53, 277-284.
- Wiesenfeld, K. (1993). An introduction to stochastic resonance. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 706, 13-25.
- Wiesenfeld, K., & Moss, F. (1995). Stochastic resonance and the benefits of noise: From ice ages to crayfish and SQUIDS. *Nature*, 373, 33-36.

Ontvangen: 15 juli 1997; geaccepteerd: 11 augustus 1997.

Keuss, P.J.G., Rossum, E.N.A. van, & Das-Smaal, E.A. (1997). *Background noise supporting the neural signaling in humans. Nederlands Tijdschrift voor de Psychologie*, 52 (5), 220-235.

Nowadays sufficient evidence exists for the benefit of background noise as it can boost a weak signal above threshold of detection – a phenomenon known as stochastic resonance. Thus, adding background noise to the signal (called dithering in physics) may be fruitful in situations where adequate functioning is marked by shortcomings in the sensory system. For example, elderly persons sometimes show reduced firing rates in the appropriate neurons, for which increased thresholds may be responsible.

In this article, first the phenomenon is explained. Next, a survey follows about the neurological information transmission route for messages in the human senses to the brain, with the intent to look at points of impact where in a beneficial way background noise can be offered to enlarge the noise-to-signal ratio. A final perspective is an applied one, while looking at what type of devices is most appropriate in order to ameliorate the neural signaling in human beings, when aged or handicapped.